

## Delovanje štirislojnih polprevodniških elementov

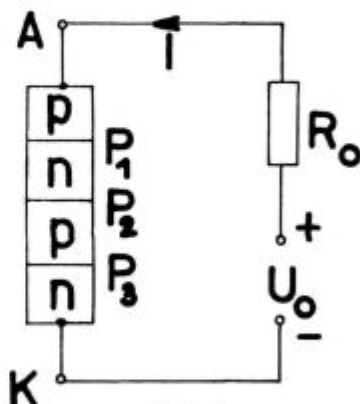
V članku so opisane elektriške lastnosti štirislojnih polprevodniških elementov — dinistorja in tiristorja. Ta dva elementa sta se pojavila na tržišču v ZDA po letu 1959. Od tedaj naprej je njihova proizvodnja dosegla velik napredek, izboljšale so se lastnosti elementov, povečal se je izbor, zaradi masovne proizvodnje se je njihova cena znižala. To velja zlasti za ZDA. V tem času so tudi nekatere evropske države začele s proizvodnjo teh elementov (Sovjetska zveza, Zahodna Nemčija, Češkoslovaška, itd.), tako da bodo štirislojni polprevodniški elementi verjetno v prihodnosti v celoti nadomestili ustrezne plinske elemente (tiratron, Hg ventil z mrežico, itd.), saj imajo v primerjavi z njimi same dobre lastnosti (majhne dimenzije, majhna krmilna moč, veliki tokovi v prevodni smeri ter sorazmerno velike napetosti v zaporni smeri, itd.). Članek je napisan z namenom, da bi te elemente spoznali, kajti v Železarni Jesenice so dobili nekaj novih naprav, ki imajo vgrajene te elemente. To so predvsem nove naprave v valjarni Bela ter žičarski stroji v HVž. Upam, da bo članek pripomogel k boljšemu razumevanju in vrževanju teh naprav.

Polprevodniški elementi s štirislojno strukturo p-n-p-n predstavljajo eno izmed oblik izvedb elementov, kateri pri določeni smeri toka prevajajo, pri spremembi smeri toka pa zapirajo — so neprevodni. Lastnosti, ki določujejo tak način prevajanja, obstojijo v gostoti primesi v slojih polprevodnika, ki sestavljajo element. Različne primesi čistemu polprevodniku lahko različno vplivajo na tip njegove prevodnosti. Razlikujemo n tip prevodnosti (presežek elektronov) in p tip prevodnosti, kjer imamo pomanjkanje elektronov in se prevajanje vrši z vrzelmi. Štirislojen polprevodniški element se sestoji iz obeh tipov prevodnosti, to je iz štirih slojev tipa p in n, ki se izmenično vrste. (Glej sliko 1.)

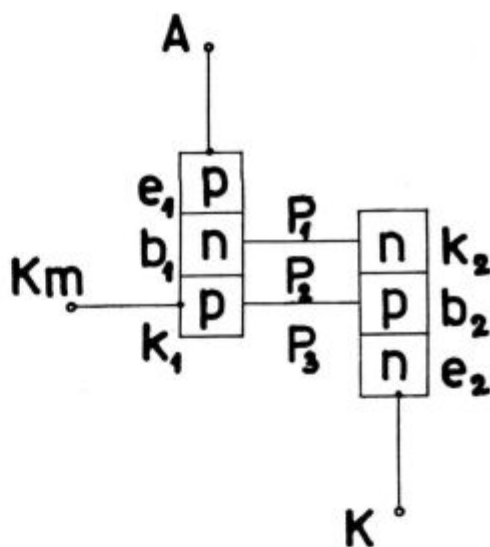
Element lahko predstavimo tudi v obliki dveh transistorjev (p-n-p in n-p-n), katera imata zvezana kolektorja (prehod  $P_2$ ). Transistorja sta vezana v pozitivni povratni zvezi, kot kaže slika 2.

Kot je razvidno iz slike 2 sta baza in kolektor transistorja Tr 1 odgovarjajoče zvezana s kolektorjem in bazo transistorja Tr 2. Razvidno je, da kolektorski tok enega transistorja prehaja čez bazo drugega ter s tem naredi notranjo povratno zvezo.

Ako priključimo na elektrodi A in K napetosti  $U_0$  (polariteta je prikazana na sliki »a«), bosta oba emitorska prehoda prevajala ( $P_1$  in  $P_3$ ), a ko-



Slika 1  
 Shematični prikaz štirislojnega prevodniškega elementa

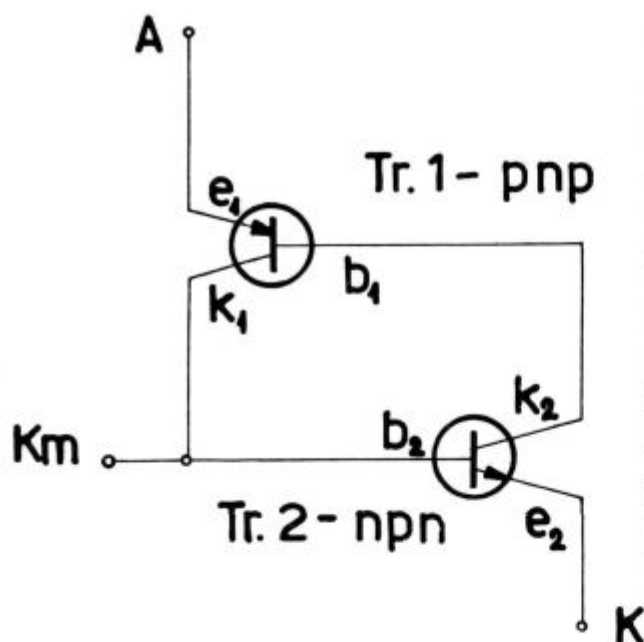


Slika 2a  
 Shematična slika strukturni prikaz

lektorski prehod  $P_2$  ne bo prevajal, temveč bo zapiral. Napetost vira  $U_0$  se bo praktično porabila na prehodu  $P_2$ . Tok  $I_{p2}$ , ki teče skozi prehod  $P_2$ , predstavlja vsoto kolektorskih tokov obeh transistorjev in toka v zaporni smeri, to je tok kolektorskega prehoda  $P_2$ , ki je polariziran v zaporni smeri. Ako označimo z  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  koeficiente ojačanja emitorskih tokov transistorjev Tr 1 (p-n-p) in Tr2 (n-p-n) dobimo tok preko prehoda  $P_2$ :

$$I_{p2} = \alpha_1 \cdot I_{e1} + \alpha_2 \cdot I_{e2} + I_{iz}$$

kjer pomeni:  $I_{e1}$  in  $I_{e2}$  . . . emitorski toki transistorja Tr 1 in Tr 2



Slika 2 b  
Vezava z dvema tranzistorjema

$I_{iz}$  . . . izgubni tok (tok v zaporni smeri kolektor-skega prehoda  $P_2$ )

Razvidno je, da morajo toki  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$  in  $I_{p2}$  biti po velikosti enaki, kot tok v zunanjem tokokrogu I:

$$I_{p2} = I_{e1} = I_{e2} = I$$

Zaradi tega velja:

$$I = \frac{I_{iz}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Enačba nam pove, da je tok I odvisen od velikosti koeficientov ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ . Tok I zelo naglo naraste, če se vsota ( $\alpha_1 + \alpha_2$ ) približa 1. Dokler je napetost  $U_0$  med elektrodami A in K majhna, so koeficienti ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  prav tako majhi, njihova suma je znatno manjša od 1, tok I je majhen ( $I \approx I_{iz}$ ). Oba transistorja se nahajata v neprevodnem stanju in upornost med elektrodami je velika (nekaj 100 kohm). Opisano stanje odgovarja neprevodnemu stanju elementa, ki ga običajno imenujemo stanje nizke prevodnosti (visoke upornosti).

Ce hočemo, da začne element prevajati, moramo povečati koeficiente ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ . Obstajata dva načina povečanja teh koeficientov. Znano je, da koeficient ojačanja emitterskega toka plastnega transistorja raste približno tako, kot raste napetost med kolektorjem in emitorjem. Zaradi tega moramo povečati napetost  $U_0$ , da bosta tudi koeficienta ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  rastla, a odgovarjajoče z njima bo rasel tudi tok I. Pri neki vrednosti napetosti  $U_0 = U_{vz}$ , kjer je  $U_{vz}$  napetost preklopa (to je napetost, ki povzroči, da element preide iz neprevodnega stanja v prevodno), eden od transistorjev, npr. Tr 1, začne prehajati v nasičeno

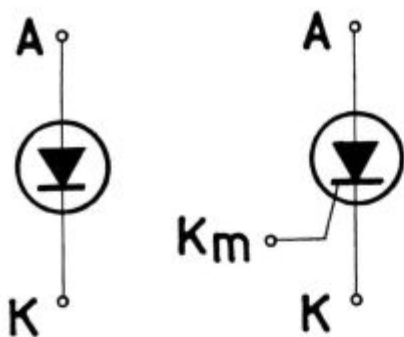
stanje. Kolektorski tok tega transistorja teče v tokokrog baze drugega transistorja Tr 2, ta se odpre ter povzroči, da se pojavi tok v tokokrogu baze prvega transistorja Tr 1. Kolektorska tokova obeh transistorjev sedaj lavinsko naraščata, koeficienta ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$  se naglo povečujeta in oba transistorja preideta v nasičeno stanje (polno prevajata). Upornost med sponkama A in K se zniža do nekaj desetink ohma. Za to stanje velja, da je  $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$  in tok I omejuje le upornost zunanega tokokroga. Takemu stanju štirisljednega polprevodniškega elementa pravimo stanje visoke prevodnosti (nizke upornosti). Čas prehoda iz enega stanja v drugo stanje traja nekaj  $\mu s$ , ob pogoju da napetost  $U_0$  trenutno povečamo. V prevodnem stanju vsi trije prehodi štiriplastnega polprevodniškega elementa izkazujejo prevajanje v prevodni smeri. Padec napetosti na elementu je le nekoliko voltov, kar je npr. enako padcu napetosti pri običajni silicijevi diodi, ako se ta napaja v nasičenem stanju (to je padec napetosti na diodi pri maksimalnem toku v prevodni smeri).

To je bil eden izmed načinov povečanja koeficientov ojačanja  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ . Drugi način povečanja teh koeficientov je osnovan na temu, da je v silicijevih transistorjih koeficient ojačanja  $\alpha$  v veliki meri odvisen od toka emitorja, koeficient zelo hitro naraste pri povečanju tega toka. Zaradi tega štirisljednega polprevodniškega elementa lahko prevedemo v prevodno stanje, ako »izpustimo« tok v tokokrogu baze enega od transistorjev. Običajno ima element narejen izvod iz srednjega p področja (baza transistorja Tr 2). V tem slučaju moramo za preklon štiriplastnega polprevodniškega elementa pustiti teči tok pozitivne polaritete čez bazo in emitor transistorja Tr 2. V slučaju, da je izvod narejen iz srednjega n področja, pa pustimo teči tok negativne polaritete čez bazo in emitor transistorja Tr 1. Oba obravnavana načina povečanja koeficientov ojačanja  $\alpha$  izkoriščamo za preklon štirisljednega polprevodniških elementov.

p področje ob strani, na katerega je priključen pozitivni pol vira napetosti  $U_0$ , bomo imenovali anoda z oznako A, n področje na drugi strani, h kateremu je priključen negativni pol vira napetosti  $U_0$ , pa bomo imenovali katoda z označbo K. Izvod iz srednjega p področja pa glede na namen uporabe imenujemo krmilna elektroda z oznako Km. Taka označba štirisljednega polprevodniških elementov je pripravna zaradi lažjega razumevanja delovanja vezav s temi elementi.

Terminologija, ki je povezana z elementi tipa p-n-p-n je zelo različna. V literaturi je mogoče zaslediti nazive kot: štirisljedna dioda, preklopna dioda, dinistor, silicijev krmiljeni ventil, krmilna dioda, stromtor, thyristor, SCR (silicon controlled Rectifier), itd. Mi bomo dvoelektrodne štirisljednega polprevodniške elemente imenovali dinistorji (D), a trielektrodne tiristorji (T).

Na naslednji sliki 3 vidimo stikalno oznako omenjenih polprevodniških elementov:



Slika 3

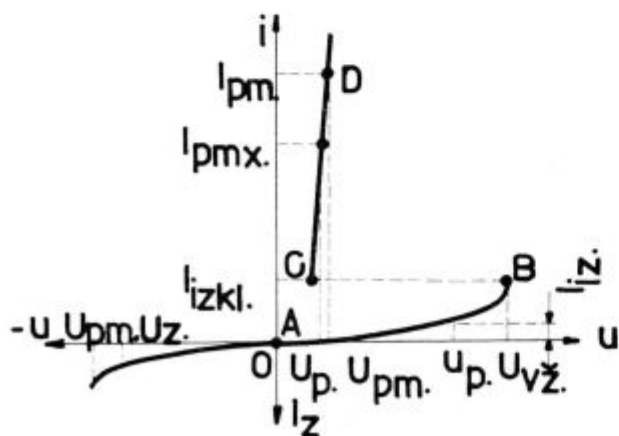
Stikalna oznaka za dinistor in tiristor

Štirislojni polprevodniški elementi so izdelani iz silicija, kar je pogojeno s: prvič: silicijev element ima zelo močno odvisnost ojačanja ( $\alpha$ ) od toka, ki teče skozi njega in drugič: silicijev element prenese večje napetosti kot npr. germanijev element.

Element je vgrajen v hermetično zaprtem metalnem ohišju, ki ga štiti od zunanjih vplivov in poškodb, obenem pa to ohišje odvaja toploto pri obratovanju elementa, kajti vsak element ima zaradi Joulovega zakona notranje izgube (zaradi notranje upornosti). To toplotno energijo moramo odvajati, če hočemo da nam bo element pravilno deloval. Elementi, ki obratujejo s srednjimi tokovi (nad 100 mA) je anodni izvod običajno izveden v obliki vijaka, ki je spojen z ohišjem.

### VA karakteristika, dinistorja

Režim obratovanja štirislojnih polprevodniških elementov zelo dobro ilustrira njihova VA karakteristika, ki je prikazana na sliki 4.



Slika 4

VA karakteristika dinistorja

Na horizontalno os je nanešena napetost  $u$  (med anodo in katodo dinistorja), a na vertikalno os tok  $i$ , ki teče čez dinistor. Del karakteristike pri pozitivnih napetostih imenujemo prevodni (desni zgorjni del), a pri negativnih zaporni del karakteristike (levi spodnji del).

Odsek AB karakteristike odgovarja izklopljenemu stanju dinistorja (pri prevodni smeri). Pri napetosti  $u_p < U_{vž}$  teče preko dinistorja le majhen izgubni tok  $I_{iz}$ , ta je tudi merilo za višino napetosti, ki je na element priklopljena v prevodni smeri ( $u_p$ ). Povišanje te napetosti ne povzroči v enaki meri povečanja toka, dokler napetost ne doseže točko  $U_{vž}$ . V tej točki karakteristike (točka B) dinistor preklopi in preide iz izklopljenega stanja v vklopljeno, pod pogojem, da lahko tok v tokokrogu naravnamo višje od neke minimalne vrednosti, ki se imenuje tok izkloplitve  $I_{izkl}$ . Napetost v prevodni smeri, odgovarjajoča točki B na karakteristiki, se imenuje napetost vžiga (preklopa)  $U_{vž}$ .

Ob preklopu se delovna točka zelo hitro prenese na odsek CD karakteristike, kateri opisuje vklopljeno stanje dinistorja. Da dinistor obdržimo v tem stanju, moramo preko njega pošiljati tok  $i \geq I_{izkl}$ . Padec napetosti (preostala napetost na elementu)  $U_p$  pri vklopljenem dinistorju običajno ne preseže 1,5 — 2 V.

Ako tok v prevodni smeri zmanjšamo do vrednosti  $i < I_{izkl}$  dinistor preide v izklopljeno stanje. Odseka AB in CD karakteristike opisujeta stabilno, a del BC nestabilno področje delovanja dinistorja. Z drugimi besedami povedano, pri določenih napetostih in tokovih se delovna točka lahko neskončno dolgo časa nahaja na delih AB in CD, medtem ko je statično stanje dinistorja, pri katerem bi delovna točka ležala na odseku BC, nemogoče.

Ako na dinistor pritismo napetost, z obratno polariteto kot kaže slika 1, tedaj sta oba stranska prehoda dinistorja neprevodna, tok v zaporni smeri je zelo majhen, dinistor se nahaja v zaporni smeri. Kadar ta napetost postane višja od prebojne napetosti  $U_{zp}$  nastopi preboj, kateri ob majhni aktivni upornosti zunanjega tokokroga dovede do poškodbe elementa. Nevarno je celo, ako le za kratek čas povišamo napetost v zaporni smeri do velikosti prebojne napetosti ali malo manj.

### VA karakteristika tiristorja

Nedostatek dinistorja je v tem, ker pri njem ne moremo spreminjati napetosti vžiga. To lahko obvladamo s tiristorjem. Na sliki 5 je prikazana VA karakteristika tiristorja pri raznih tokovih  $I_{km}$  v tokokrogu krmilne elektrode.

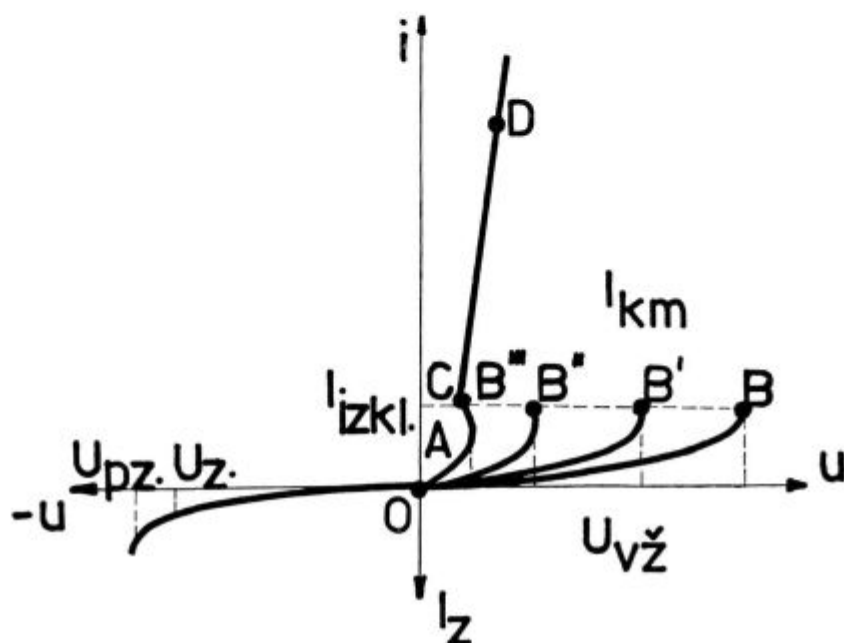
Krivulja pri tokokrogu  $I_{km} \approx 0$  je analogna obravnani karakteristiki dinistorja, torej odgovarja stanju, ako je krmilna elektroda izklopljena. Ako povečujemo tok krmilne elektrode se odsek AB karakteristike krajša in napetost vžiga (pre-

$$B'' = U_{VZ}'' \cdot I_{km}'' = \max.$$

$$B' = U_{VZ}' \cdot I_{km}'$$

$$B = U_{VZ} \cdot I_{km}$$

$$B = U_{VZ} \cdot I_{km} = 0$$



Slika 5 VA karakteristika tiristorja

klopa) se znižuje. Pri zadostno velikih krmilnih tokovih npr. pri toku  $I_{km}$ , del karakteristike, ki opisuje izklopljeno stanje elementa izgine in VA karakteristika tiristorja preide v karakteristiko normalnega silicijevega ventila (dioda).

Krmilna elektroda igra vlogo vžigne elektrode, kot je npr. vloga mrežice pri tiratronu. Ko tiristor s pomočjo toka krmilne elektrode vklopimo, izgubi on svoje krmilne lastnosti, ter da bi ga izklopili je potrebno, da zmanjšamo tok v prevodni smeri in sicer nižje od velikosti  $I_{izkl}$ . Tiristor lahko vklopimo s pomočjo tokovnih impulzov v tokokrogu krmilne elektrode, ki trajajo nekaj mikrosekund. (ob pravilni polariteti napetosti na elementu).

Obravnavani način preklopa tiristorja s pomočjo toka v krmilnem tokokrogu ima velike prednosti. Z njim popolnoma poljubno krmilimo tiristor s tem, da s krmilnim tokom nastavimo napetost vžiga, poleg tega pa nam da možnost krmiljenja velikih moči z malimi močmi krmilnih impulzov.

Zelo važna lastnost tiristorja je ta, da lahko obratuje z impulzi z amplitudo  $I_{pm}$ , kateri so lahko večji od največjega dopustnega stalnega toka v

prevodni smeri  $I_{pmaks}$ . Torej s takimi elementi lahko preklaplamo tudi velike impulzne moči.

Običajno ne nastavljamo višino vžigne napetosti s konstantnim tokom v krmilnem tokokrogu. Iz zgornjih izvajanj smo videli, da nam impulz z amplitudo, ki odgovarja največjemu dopustnemu krmilnemu toku, preklopi tiristor v vklopljeno stanje v nekaj s. Ako hočemo npr. krmiliti višino usmerjene napetosti, bomo to storili z večjo ali manjšo časovno zakasnitvijo impulzov in ne z morebitno spremembo konstantnega krmilnega toka, ker je to neekonomično.

#### VKLOP IN IZKLOP ELEMENTOV

V večini vezav, kjer uporabljamo štirislajne polprevodniške elemente, se uporabljajo za vklop ali izklop elementa impulzi. Z impulzi torej element preklopimo iz enega stanja v drugega. Ti impulzi se imenujejo startni impulzi, uporabljamo pa jih v tokokrogu krmilne elektrode pri tiristorju, medtem ko pri dinistorju uporabljamo tak impulz v tokokrogu anoda-katoda. Osnovna zahteva, ki se

postavlja pri vezavah s temi elementi je v zanesljivosti ohranitve vklopljenega ali izklopljenega stanja ter v hitrem prehodu iz enega stanja v drugo pri delovanju impulza.

Za zanesljivo ohranitev izklopljenega stanja je neobhodno potrebno, da je napetost na elementu v prevodni smeri le:

$$U_p \leq (0,7-0,8) U_{vž}$$

in ne več. Proizvajalci garantirajo za določen tip štirisljednega polprevodniškega elementa napetost s tem pogojem.

Dinistor preide iz izklopljenega stanja v vklopljeno stanje, če je na njega pritisnjena v prevodni smeri nekoliko višja napetost od napetosti vklopa, to je:

$$U_o > U_{vž}$$

Pri napetosti vira

$$U_o < U_{vž}$$

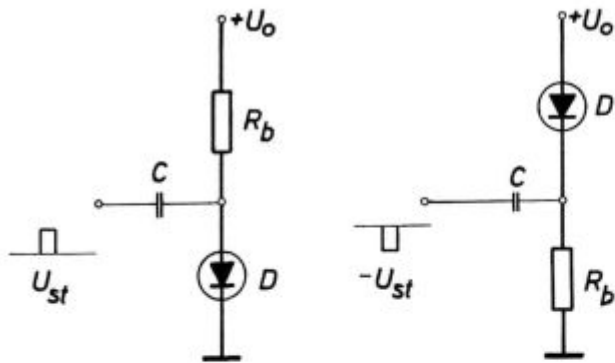
se preklon lahko doseže s pomočjo startnega napetostnega impulza  $U_{st}$  odgovarjajoče polaritete, katera se prištevata napetosti med elektrodama (v tem primeru moramo zadostiti pogoj):

$$U_o + |U_{st}| \geq U_{vž}$$

S tem dinistor preklonimo iz izklopljenega stanja v vklopljeno. Ako hočemo dinistor zopet spraviti v izklopljeno stanje, moramo zmanjšati tok skozi dinistor in sicer na vrednost:

$$I \leq I_{izkl.}$$

Slika 6 kaže primera, kako lahko dosežemo vklopitev dinistorja



Slika 6

Vklop dinistorja s startnimi impulzi

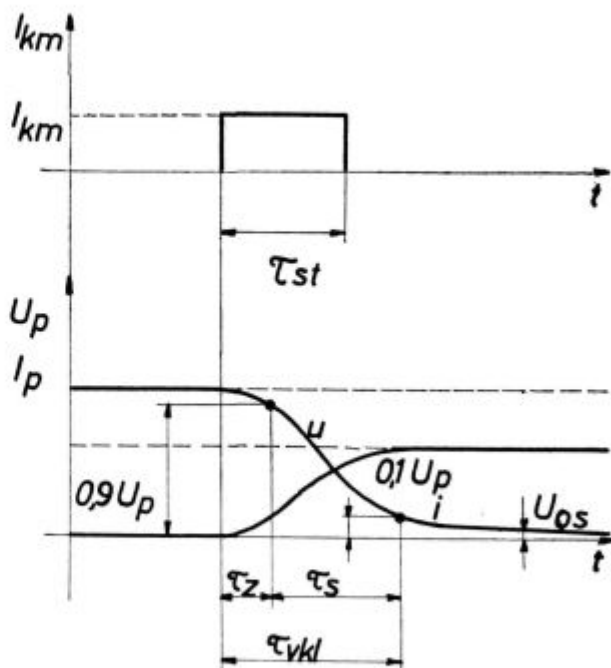
Prva nam prikazuje vklop dinistorja s pomočjo pozitivnega startnega impulza, druga pa s pomočjo negativnega startnega impulza.

Tiristorji delajo v režimu pri katerem vladajo pogoji:

$$U_o < U_{vž}$$

in preklonijo iz izklopljenega stanja v vklopljeno, seveda pri polariteti za prevodno stanje tiristorja,

ako damo v tokokrog krmiljne elektrode tokovni impulz. Slika 7 nam podaja časovno karakteristiko preklopa tiristorja.



Slika 7

Časovna karakteristika preklopa tiristorja

Slika nam prikazuje, da lahko čas preklopa tiristorja iz izklopljenega stanja v vklopljeno  $\tau_{vkl}$  razdelimo na dva intervala in sicer:

- čas zadrževanja  $\tau_z$
- čas stabilizacije  $\tau_s$

Čas zadrževanja je potreben zato, da se v okolici krmilne elektrode nabere zadosti velik naboj, ki povzroči proces lavine in s tem prevajanje tiristorja. Čas stabilizacije pa je potreben za stabiliziranje stanja visoke prevodnosti. Po izvršitvi procesa preklopa ostane na tiristorju le še minimalen padec napetosti.

Za zanesljiv preklon tiristorja je potreben startni impulz, ki traja:

$$\tau_{st} > \tau_z$$

Pri večjih tokovih v tokokrogu krmiljne elektrode  $I_{km}$ , se lahko čas nekoliko skrajša in s tem je lahko čas trajanja startnega impulza krajši. Po eksperimentalnih podatkih za tiristorje sovjetske proizvodnje tipa D 235 in D 238 mora biti pri maksimalnem toku krmilne elektrode  $I_{km_{maks}}$  čas trajanja startnega impulza  $1,5-3 \mu s$  in ne krajši. Generator startnih impulzov mora imeti dovolj nizko impedanco, da lahko dobimo dovolj velik krmiljni tok. Navajam nekatere parametre za tiristorje iz sovjetske proizvodnje.

Tiristorji tipa VKDUV:

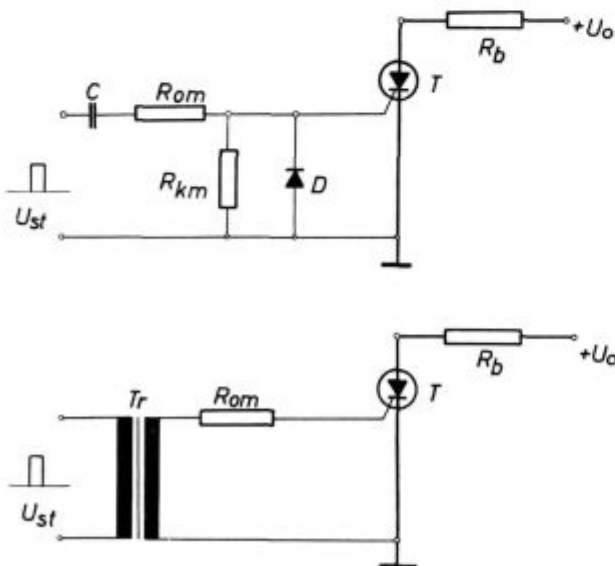
- moč krmilnega toka . . . . . 20 W
- dopustna amplitudna vrednost napetosti startnega impulza . . . . . 20 V
- dopustna amplitudna vrednost toka startnega impulza . . . . . 1 A
- čas trajanja amplitudne vrednosti toka startnega impulza (minimalno) . . . . .  $2 \cdot 10^{-5}$  s
- delovni tok, srednja vrednost (A) . . . . . do 200 A
- padec napetosti, srednja vrednost (V) . . . . . do 0,9 V
- maksimalna napetost preklopa (v prevodni smeri, amplitudna vrednost) . . . . . do 1000 V
- maksimalna zaporna napetost (amplitudna vrednost) . . . . . do 1000 V
- temperatura pnpn strukture . . . . . do  $+110^{\circ}$  C
- čas vklopa  $\tau_{vkl}$  . . . . . do  $10 \mu$ s
- čas izklopa  $\tau_{izkl}$  . . . . . do  $25 \mu$ s
- frekvenca komutacije . . . . . 500 Hz
- načini hlajenja: vodno, prisilno z ohlajevalcem, množina vode 30 l/min., temperatura vode  $+30^{\circ}$  C . . . . .
- teža tiristorja z radiatorjem . . . . . 1150 gr
- brez radiatorja . . . . . 450 gr

Že iz teh podatkov, ki so seveda mejni, lahko izračunamo močnostno ojačanje:

$$A_m = \frac{g}{P_{km}} = \frac{1000 \cdot 200}{1 \cdot 20} = 10000$$

Ta faktor je zelo visok. Torej resnično drži trditev, da lahko z malim tokom v tokokrogu krmiljne elektrode krmilimo glavni bremenski tok.

Na sliki 8 sta prikazana dva načina vklopa tiristorja s startnimi impulzi.



Slika 8  
Vklop tiristorja s startnimi impulzi

Kapacitivnost ločilnega kondenzatorja C mora biti tolikšna, da bi ob koncu delovanja startnega impulza v krmilnem tokokrogu vzdrževal tok:

$$I_{km} \geq I_{km_{min}}$$

Običajno se kapacitivnost kondenzatorja izbira v mejah med  $0,03$  do  $0,1 \mu$ F. Dioda D preprečuje pojavo negativnega impulza v krmilnem tokokrogu pri prazenju kondenzatorja. Kondenzator ni potreben tam, kjer nimamo enosmerne napetosti v pavzah med impulzi (npr. shema s transformatorjem).

Da prilagodimo impedanco vira startnih impulzov k tiristorskemu tokokrogu, večkrat uporabljamo transformator. Pri tem stiku seveda odpade tudi kondenzator.

Za omejitev toka do te meje, da ni nič več nevaren tiristorju, je priporočljivo v krmilni tokokrog vezati upor Rom z upornostjo nekaj deset ohmov. Upor Rkm z upornostjo  $0,5-3$  kohm prekrbi galvanško zvezo krmiljne elektrode s katodo tiristorja.

Pri preklopu štirislajnih polprevodniških elementov vseh tipov iz vklopljenega v izklopljeno stanje je nujno, da je tok skozi tiristor:

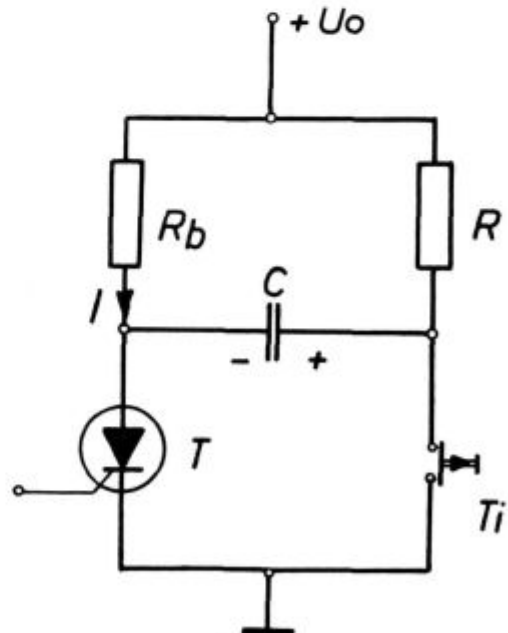
$$I_p < I_{izkl}$$

(za tiristorje mora biti v tem primeru  $I_{km} = 0$ ).

Praktična izvedba izklopa je izvedena sledeče:

- prekinitve anodnega tokokroga
- povečanje upornosti upora, ki je priklopljen zaporedno z elementom
- ako uporabimo izmenično napetost (tok preneha, ko gre napetost preko 0)
- ako damo na anodo napetost, ki je kratkotrajna in obratne polaritete

Zadnji način izklopitve elementa ilustrira veza na sliki 9.



Slika 9  
Izklop tiristorja

Pri vklopu tiristorja T se polni tudi kondenzator C in čez določen čas:  $\approx 3\tau$ , kjer pomeni:

$$\tau = R \cdot C$$

to je časovna konstanta tokokroga polnjenja kondenzatorja, postane napetost na tem kondenzatorju  $U_c$ , enaka napetosti napajanja  $U_0$ . Pri pritisku tipke T1 tiristor dobi napetost  $U_c$ , ki je obrnjene polaritete kot napajalna napetost  $U_0$ , kar privede do njegovega izklopa. To velja pod pogojem, če je:

$$U_0 < U_{vž}$$

Popolnoma analogna shema se lahko uporabi tudi za dinistor.

Pri takih načinih izklopa sledi, da moramo uporabljati take štirislojne polprevodniške elemente, ki imajo garantirano napetost v zaporni smeri ( $U_z$ ). Kapacitivnost komutirajočega kondenzatorja mora biti dovolj velika, da bi se napetost v zaporni smeri na elementu ohranila toliko časa, kolikor je potrebno za njegov izklop. To je podano z:

$$C \geq \frac{I_p \cdot \tau_{izk}}{U_0} (\mu F)$$

kjer pomeni:

$I_p$  — tok v prevodni smeri (tok obremenitve) (A)

$\tau_{izk}$  — čas izklopa elementa ( $\mu s$ )

$U_0$  — napetost napajalnega vira (V)

Čas izklopa  $\tau_{izk}$  štirislojnih polprevodniških elementov se razdeli na dva intervala:

1. čas padca toka v prevodni smeri do  $0,1 I_p$ ,  $\tau_p$
2. čas, ki je potreben za ustavitev krmilnih lastnosti elementa,  $\tau_{ust}$ .

Čas padca normalno ni večji od  $1 \mu s$ , čas  $\tau_{ust}$  pa je odvisen od vrste pogojev, npr. proporcionalen je temperaturi pri prehodu, proporcionalen je velikosti toka v prevodni smeri, kateri je tekkel neposredno pred njegovim izklopom, itd. Čas izklopa je kar enak:

$$\tau_{izk} = \tau_p + \tau_{ust} \approx \tau_{ust}$$

Naveden je v tovarniških podatkih elementa. To smo že navedli predhodno za tiristorje sovjetske proizvodnje.

Na element v presledku  $t < \tau_{izk}$  ne smemo ponovno dati napetost v prevodni smeri. Ako damo napetost v zaporni smeri nam kažejo eksperimentalni podatki, da se zmanjša  $\tau_{izk}$  za 20–30%. Podaljšanje procesa izklopa  $\tau_{izk}$  določa minimalni interval med dvema zaporednima vklopoma, to je mejna frekvenca komutacije.

Štirislojni polprevodniški elementi delajo do frekvence nekoliko 10 kHz.

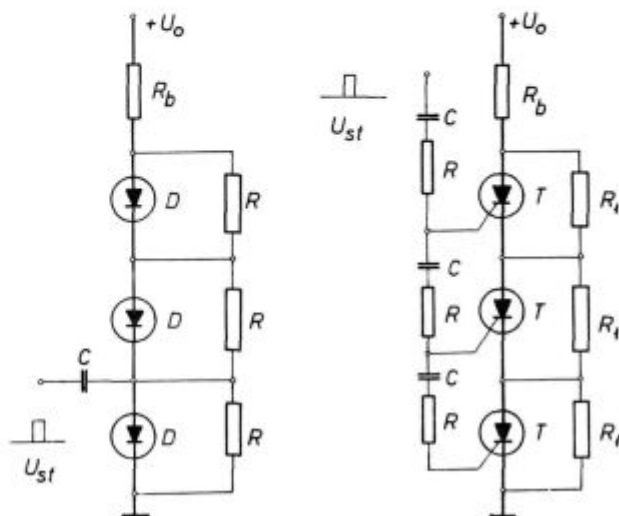
Če hočemo povečati komutacijsko moč, moramo povečati tok in napetost v prevodni smeri. Vendar gremo lahko samo do  $I_{pmax}$  in  $U_{pmax}$ , to je do mejnih vrednosti elementov. Za povečanje komutacijske moči lahko elemente vezemo zaporedno. Vendar moramo zaradi pravilne razdelitve napetosti na posamezne elemente imeti paralelno k vsakemu elementu še upor. Velja, da se izklopljeno stanje ohrani, če je:

$$U_0 < m \cdot U_{vž}$$

kjer pomeni:

$m$  — število elementov

Preklop iz izklopljenega stanja v vklopljeno dosežemo s startnim impulzom in sicer pri dinistorjih tako, da z impulzom vklopimo samo en dinistor. Ko ta vklopi, je s tem sedaj na druge elemente pritisnjena večja napetost od  $U_{vž}$ , in preidejo v vklopljeno stanje. Pri tiristorjih pa vezemo vse krmiljne elektrode preko kondenzatorjev skupaj in uporabimo en startni impulz. Slika 10 nam prikazuje opisane vezave.

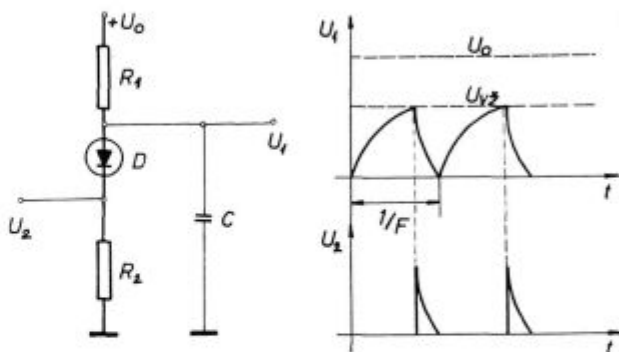


Slika 10

Zaporedne vezave elementov

## UPORABA DINISTORJEV

Kot smo videli, je dinistor preklopni element in se uporablja tudi v vezjih, kjer je preklop funkcija napetosti. To pa je zelo obširno področje, zato je tudi uporabnost dinistorjev zelo velika. Upam, da se bo iz obravnavanih primerov dovolj jasno videlo, kako vsestransko je element uporabljiv. Slika 11 nam prikazuje generator žagaste napetosti.



Slika 11

Generator žagaste napetosti

Ko priključimo napetost  $U_0$ , ki mora biti večja od  $U_{vž}$ , se začne kondenzator C polniti preko  $R_1$ . Napetost na kondenzatorju raste tako dolgo, do-

kler ne doseže  $U_{vž}$ . V tem momentu dinistor vklopi in začne prevajati ter izprazni kondenzator C. Če je upornost  $R_1$  izbrana tako, da velja:

$$\frac{U_0}{R_1} < I_{izkl.},$$

se po izpraznitvi kondenzatorja dinistor vnovič povrne v izklopljeno stanje in proces se ponovi. Upornost  $R_2$ , ki je:

$$R_2 \ll R_1$$

je v tokokrogu zaradi tega, da omeji tok skozi dinistor.

Pogoj, da to vezje deluje je:

$$U_0 \gg U_{vž}$$

Frekvenca žagaste napetosti je:

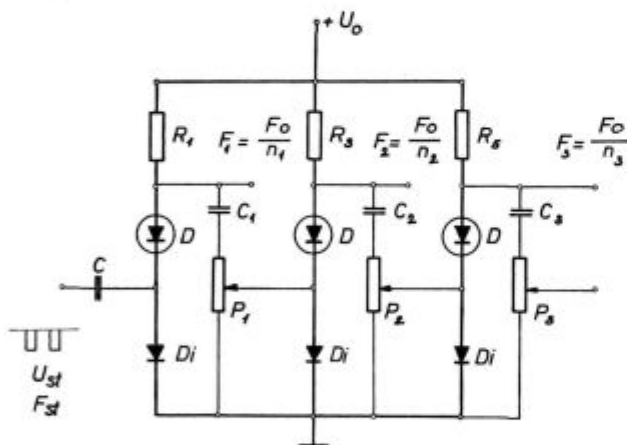
$$F = \frac{1}{R_1 C \ln \frac{1}{1-\gamma}}$$

kjer je:

$$\gamma = \frac{U_{vž}}{U_0}$$

Istočasno pa ob vsakem vklopu dinistorja dobimo impulz  $U_2$ , s frekvenco F, kot je frekvenca žagaste napetosti  $U_1$ .

Slika 12 nam prikazuje delitelj frekvence z dinistorji.



Slika 12  
Frekvenčni delitelj

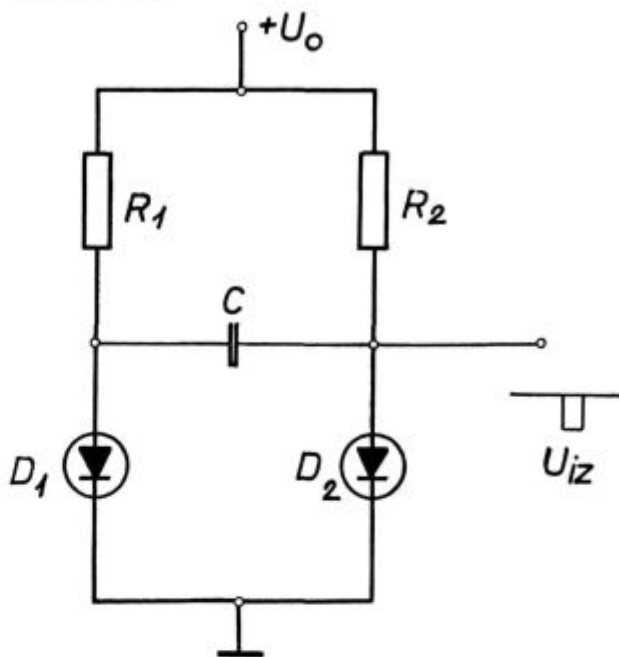
Napetost raste na kondenzatorju C eksponentno. Ako je v momentu prihoda sinhronizacijskega impulza napetost na kondenzatorju  $U_c$  taka, da velja:

$$U_c + |U_{sinhr}| < U_{vž}$$

potem dinistor ne vklopi. Ako povečamo sinhronizacijske impulze amplitudno tako, da bo dinistor prekopil v vklopljeno stanje in sicer ne pri prvem impulzu, ampak šele pri drugem, dobimo delitelj frekvence ( $n = 2$ ). Slika prikazuje trikaskadni delitelj frekvence. Z upori  $P_1$ ,  $P_2$  in  $P_3$  pa postavljamo

velikost faktorja delitve n. Dioda pa je vgrajena za preprečitev negativnega povratnega impulza, upori  $R_1$ ,  $R_3$  in  $R_5$  pa so vstavljeni v vezje zato, da omejijo tok skozi dinistor na dopustno vrednost.

Slika 13 nam prikazuje astabilni multivibrator z dinistorji.



Slika 13  
Astabilni multivibrator

Pogoj za delovanje tega vezja je:

$$U_0 > U_{vž}.$$

Pri priklopu napetosti  $U_0$  eden od obeh dinistorjev mora preklopiti v vklopljeno stanje. Predpostavimo, da dinistor  $D_1$  vklopi. Steče tok  $I_p$  in nastane padec napetosti na  $R_1$ . Zato se začne kondenzator C polniti preko upora  $R_2$ . Dinistor  $D_1$  se izklopi, čim se na kondenzatorju pojavi napetost  $U_c = U_{vž}$ , kajti ta napetost je za  $D_1$  negativna napetost. Zaradi tega se zdaj dinistor  $D_2$  vklopi, kajti  $U_c = U_{vž}$  je za dinistor  $D_2$  pozitivna napetost. Kondenzator se izprazni preko dinistorja  $D_2$  in se začne polniti preko upora  $R_1$ . Proces se ponavlja in na izhodu dobimo negativne impulze  $U_{iz}$ .

Drugi pogoj, da naprava deluje je:

$$\frac{U_0 - U_{vž}}{R} > I_{izkl.},$$

sicer bi dinistor sam izklopil, takoj ko bi tok padel pod vrednost  $I_{izkl.}$

Ako predpostavimo:

$$R_1 = R_2 = R \\ U_{vž1} = U_{vž2} = U_{vž}$$

in ima kondenzator vrednost:

$$C \geq \frac{I_p \cdot \tau_{izkl}}{U_0} (\mu F)$$



tedaj dobimo frekvenco:

$$F = \frac{1}{2 RC \ln \frac{1}{1-\gamma}}$$

pri čemer velja:

$$\gamma = \frac{U_{vz}}{U_0}$$

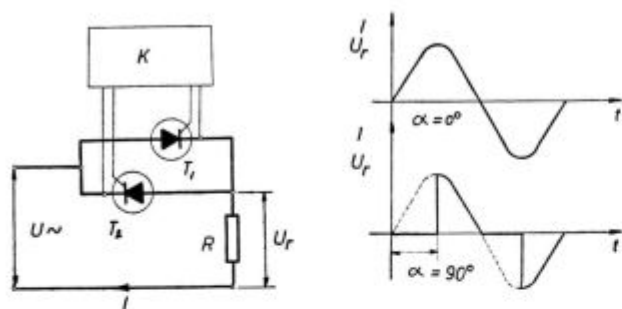
Ogledali smo si nekaj osnovnih vezav z dinistorji. Mislim, da primeri dovolj jasno ilustrirajo uporabnost teh elementov.

## UPORABA TIRISTORJEV

Tiristorje uporabljamo v najrazličnejše namene, kot:

- za krmiljenje izmeničnih tokov
- za krmiljeni usmernik
- za krmiljeni razsmernik
- za stikalo pri enosmernih tokovih
- za krmiljenje srednje vrednosti enosmerne napetosti s spreminjanjem razmerja časov vklopa in izklopa
- za pretvarjanje enosmernega toka v izmeničnega s prisilno komutacijo

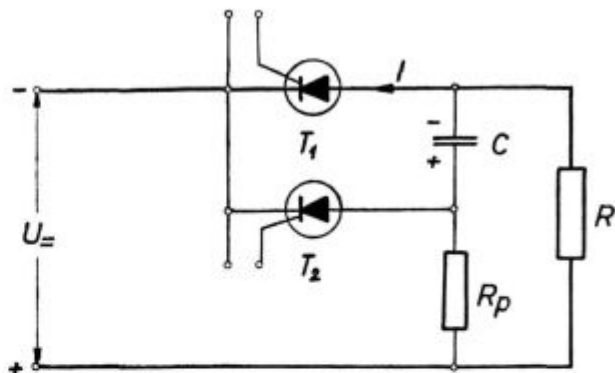
Ako ilustriramo nekatere zgornje trditve s primeri, bomo najbolj videli uporabnost tiristorjev. Slika 14 nam prikazuje krmiljenje izmeničnega toka.



Slika 14  
Krmiljenje izmeničnega toka

Ce premikamo impulze, ki jih daje posebna krmiljna naprava K za kot  $\alpha$  relativno glede na napajalno napetost  $U$ , tedaj spreminjamo čas prevajanja posameznega tiristorja in s tem izmenično napetost  $U_R$  na bremenu  $R$ . Vezje je reverzibilno ter ga uporabljamo od reda  $mW$  do reda več  $100 kW$ .

Slika 15 nam prikazuje tiristor kot stikalo v enosmernih tokokrogih.

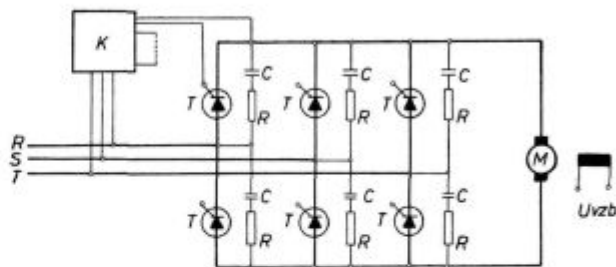


Slika 15  
Tiristor kot stikalo

V vezju na sliki n moramo tiristorja le vklopiti, izklopijo pa se sami (ko gre napetost skozi 0). V enosmernih tokokrogih tega ni in moramo zato uporabljati posebna vezja. Zgornja slika prikazuje tako vezje. Če glavni tiristor  $T_1$  prevaja, tedaj se kondenzator  $C$  polni čez pomožni upor  $R_p$ . Ko vklopimo pomožni tiristor  $T_2$ , se tiristor nenadno negativno polarizira in se tok  $I$  skozi glavni tiristor  $T_1$  zmanjša pod  $I_{izk.}$ , zato tiristor  $T_1$  neha prevajati. Tako lahko vidimo, da vezje deluje kot enosmerno stikalo.

Eno najvažnejših področij uporabe tiristorjev je krmiljenje enosmerne strojev. Sodobni stroji zahtevajo vse več reguliranih pogonov s srednjimi močmi in tam so tiristorji najbolj uporabni. Zato tudi današnja tehnika vse bolj uporablja tiristorška vezja za krmiljenje Ward-Leonardovih agregatov ali pa manjših enosmerne strojev. Tiristorji se odlikujejo zaradi zelo dobrega izkoristka, majhnih dimenzij, zelo hitrega delovanja, majhne teže in sorazmerno velike mehanske neobčutljivosti.

Slika 16 nam prikazuje trifazno mostično tiristorško usmerniško vezavo.



Slika 16  
Trifazna mostična tiristorška usmerniška vezava

Bistvo te vezave je v tem, da lahko s časovno premaknitvijo impulzov (za kot  $\alpha$  relativno glede na vhodno napetost) reguliramo izhodno srednjo vrednost enosmerne napetosti, ta pa lahko napaja npr. tokokrog vzbujanja, ali pa kotvin tokokrog enosmerne stroja. Torej s spreminjajo enosmerne napetostjo lahko spreminjamo število vrtljajev motorja.

Slika prikazuje tudi zaščito tiristorjev z RC elementi. Ta zaščita je predvsem prenapetostna in sicer proti udarnim prenapetostim. Vrednost elementov je:

$$C \approx 0,5 \mu\text{F}$$

$$R \approx 10 \text{ ohm}$$

Kot pretokovno zaščito uporabljamo ultrarapidne talilne varovalke. Pogosto pa izvedemo za preobremenitve zaščito z »mrežno zaporo«, ki je znana že iz Hg usmerniške tehnike.

### KRMILJENJE VAUGHN ŽIČARSKIH STROJEV S TIRISTORJI

V Železarni Jesenice smo v okviru rekonstrukcije žičarne dobili nove ameriške stroje firme VAUGHN. Po svoji konstrukciji, tako mehanski kot električni, so izvedeni zelo zahtevno. Za nastavljanje brzine pa so uporabljeni najnovejši polprevodniški elementi (transistorji, diode, zenner diode in tiristorji). Zagon, nastavljanje željene hitrosti in ustavitev je izvedena električno. Za zagon in nastavljanje brzine je vgrajen poseben enosmerni ojačevalec — generator, kajti značilnost žičarskih strojev je v tem, da stroj začne vleči žico počasi in da po določenem času pride aperiodično do

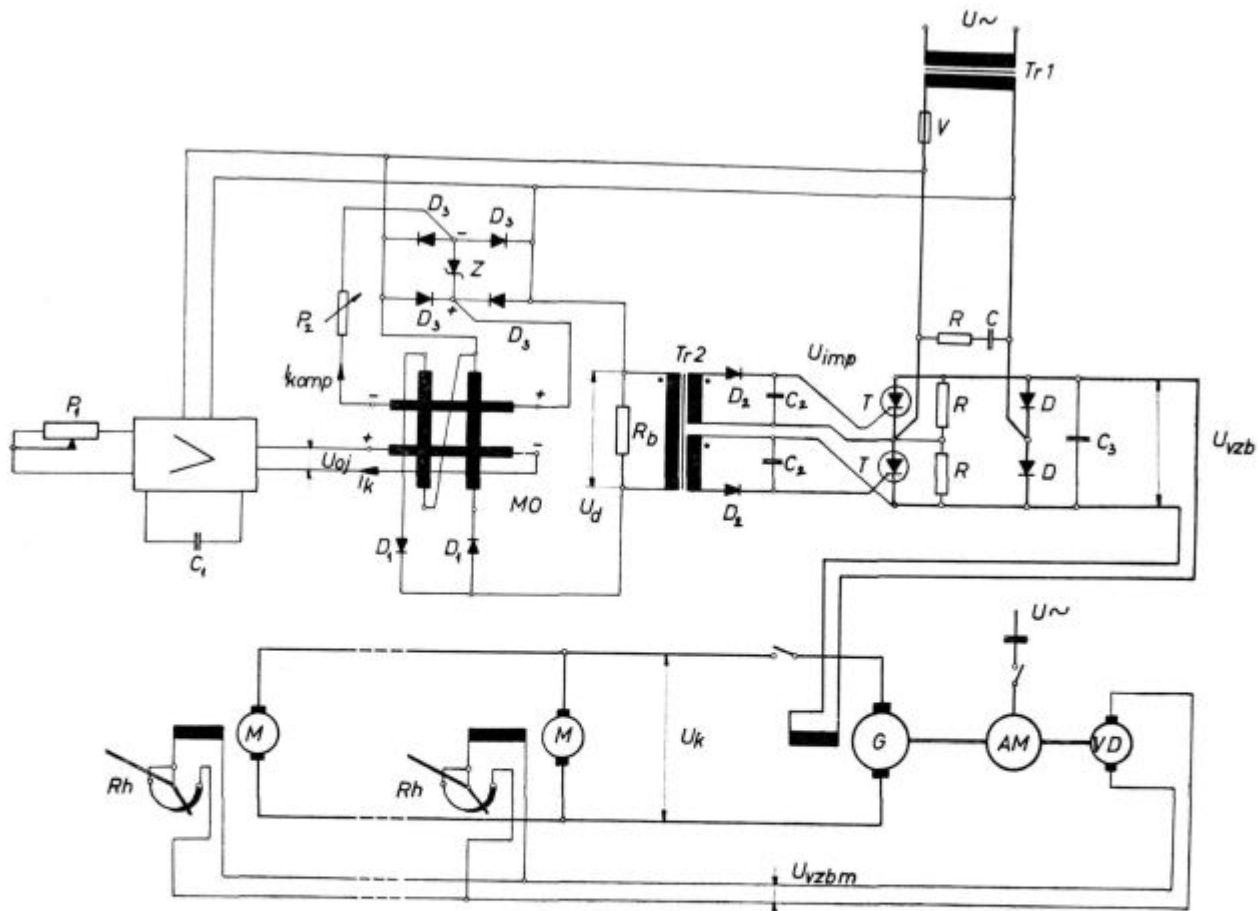
polne, odnosno do željene hitrosti. Podobno je pri menjavi hitrosti (npr.: z manjše hitrosti na večjo). Zaviranje je izvedeno električno in sicer tako, da stroj potroši energijo magnetnega polja in vztrajnosti, ki še ostane v strojih po izkloplitvi, v ohmskih uporih. S tem dosežemo hitro zaustavitev stroja, kar je za posluževalca stroja življensko važno.

Kot sem že omenil, so stroji izvedeni zelo moderno. Skušal bom opisati en tak stroj, princip je tudi pri ostalih strojih te firme enak.

Pogon stroja je izveden z enosmernimi motorji, te pa napaja enosmerni generator. Enosmerni generator mehansko žene asinhronski kratkostičen motor, ta pa tudi poganja vzbujevalni generator za vzbujanje enosmernih motorjev. Vidimo, da je uporabljen princip Ward-Leonardovega agregata. Vzbujanje enosmernega generatorja pa je izvedeno s tiristorji. Podrobno vezje nam kaže slika 17.

Enosmerni motorji imajo tuje vzbujanje, ki je konstantno, te tokokroge pa napaja vzbujevalni generator. Teh motorjev je več, odvisno seveda od tega, koliko stopenjski je stroj.

Mi torej opisujemo večstopenjski stroj za vlečenje žice. Pod pojmom stopnja razumemo eno od reduciranj preseka žice. Da to dosežemo, moramo imeti navijalni boben, ki vleče žico skozi votlico, ki je vgrajena pred njim. Torej za eno stopnjo



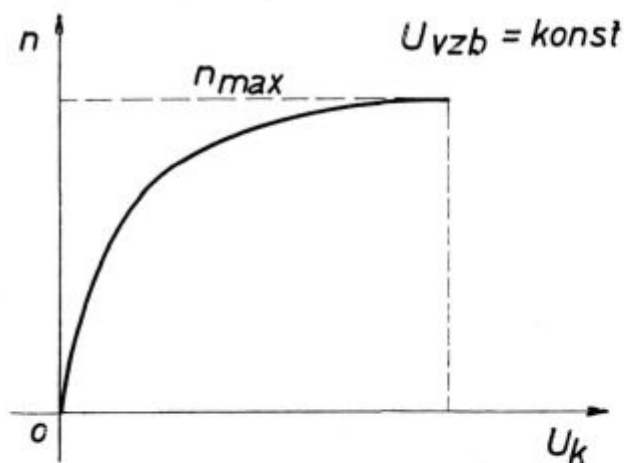
Slika 17  
Shema krmiljenja VAUGHN žičarskih strojev

moramo imeti vlečni boben in votlico. Vsak vlečni boben pa poganja enosmerni motor. Pri vsaki stopnji reduciramo presek za cca 25 %, torej je žica po tej stopnji daljša za cca 25 %, zato se mora vlečni boben vrteti za 25 % hitreje od prejšnje stopnje. To povečanje hitrosti je izvedeno mehansko s pomočjo reduktorja. Vsaka stopnja ima torej večjo brzo vrtenja zaradi žice, ki se podaljšuje. Vrtilni reostat, ki je vezan v vzbujevalnem tokokrogu motorja, potrebujemo samo za fino regulacijo števila vrtljajev motorja. Od kota zavrtitve reostata je namreč odvisna vzbujevalna napetost in s tem vrtljaji motorja. Reostat je preko ročice mehansko vezan s kolutom, preko katerega teče žica. Na drugi strani imamo vzmet, ki kolot pritiska nazaj. Bistvo tega je, da se primerjata sila vleka žice in sila odpora vzmeti. Ko sta ti dve sili v ravnotežju, drsnik na reostatu miruje, torej motor se vrti s pravilnim številom vrtljajev (vzbujanje motorja je pravilno). Ako se reostat premakne, je vzrok v temu, da je vlek žice premagal odpor vzmeti, torej se motor vrti prepočasi, zato se bo reostat zavrtel tako, da bo zmanjšal vzbujevalni tok skozi motor in stanje se bo stabiliziralo. Če pa je vlek vzmeti prevelik, se bo reostat tako zavrtel, da bo povečal vzbujevalni tok skozi motor, motor bo začel teči počasneje in stanje se bo prav tako stabiliziralo.

Ako se sedaj povrnemo nazaj na sliko 17, vidimo da je vzbujanje generatorja izvedeno s tiristorji. Mi lahko zvezno spreminjamo napetost  $U_{vzb}$ , s tem zvezno spreminjamo napetost  $U_k$  in zaradi tega lahko tudi nastavljam poljubno število vrtljajev, torej hitrost vleka žice.

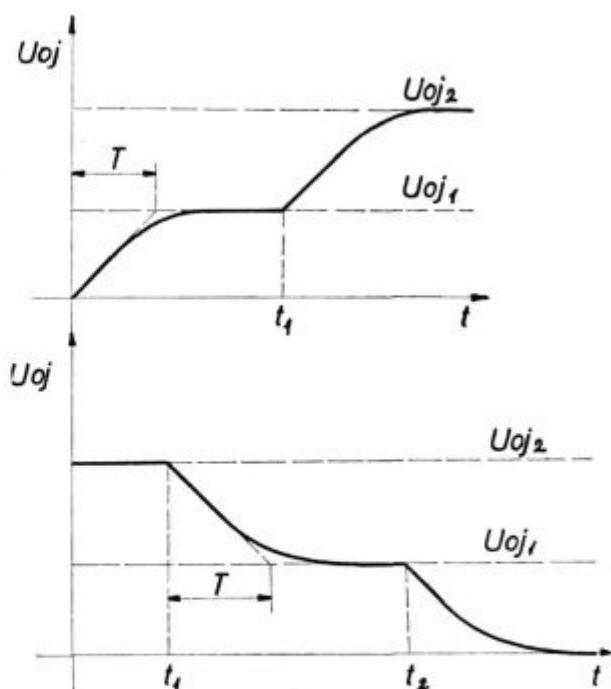
Slika 18 nam prikazuje to odvisnost, seveda pod pogojem, da je napetost  $U_{vzb_m}$  konstantna.

Ta v našem primeru zelo malo variira, torej karakteristika prikazuje relane razmere.



Slika 18  
Karakteristika enosmernega motorja

Slika 17 nam prikazuje tudi celotno krmiljenje tiristorjev, vključno z impulzno napravo. S potenciometrom  $P_1$  nastavljamo velikost napetosti  $U_{oj}$ , kondenzator  $C$  pa je vgrajen zaradi tega, da dobi-



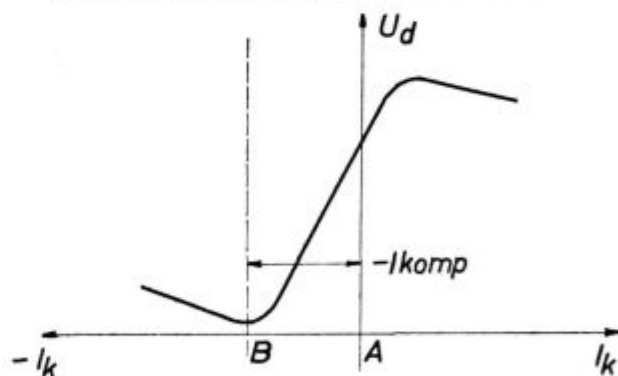
Slika 19  
Časovni diagram napetosti  $U_{oj}$

mo pravilno časovno konstanto naraščanja napetosti  $U_{oj}$ . Slika 19 nam kaže, kakšna naj bo ta napetost. Časovna konstanta  $T$  naj bo taka, da bo stroj počasi pridobival na hitrosti (reda 5 sek.). To je važno zaradi tega, da stroj izčrpa ob prehodnih pojavih ne odtrga.

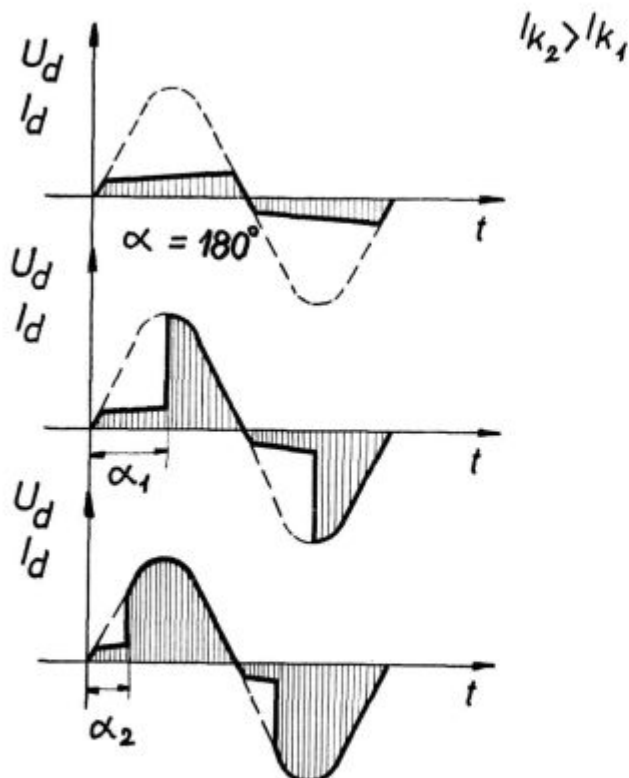
Napetost  $U_{oj}$  napaja magnetni ojačevalnik  $MO$ . Ta skupno z impulznim transformatorjem  $Tr_2$  tvori impulzno napravo za krmiljenje tiristorjev. Naprava deluje takole: sinhronizacija med impulzi in napajalno napetostjo  $U_{\approx}$  je dosežena tako, da imamo skupni transformator  $Tr_1$ , ki napaja impulzno napravo ter vzbujevalni tokokrog. S tem je problem sinhronizacije odpadel.

Napetost  $U_{oj}$  napaja eno od krmiljnih navitij  $MO$ . Bistvo  $MO$  je v tem, da na izhodu dobimo tako veliko izmenično napetost, kolikor je veliko vzbujanje (napetost  $U_{oj}$ ).

Slika 20 nam prikazuje karakteristiko  $MO$ .

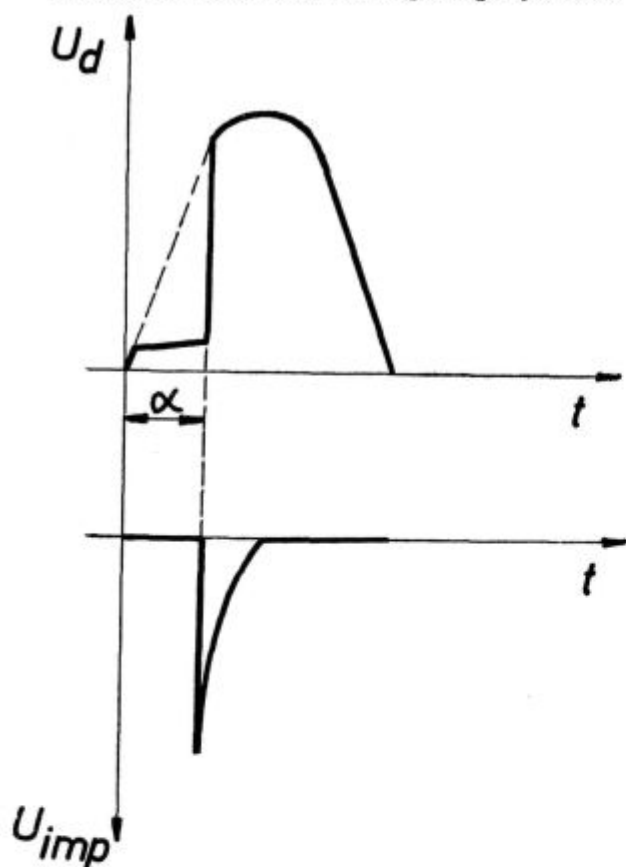


Slika 20  
Karakteristika magnetnega ojačevalca



Slika 21

Razmere na sekundarni strani magnetnega ojačevalca



Slika 22

Razmere na primarni in sekundarni strani impulznega transformatorja

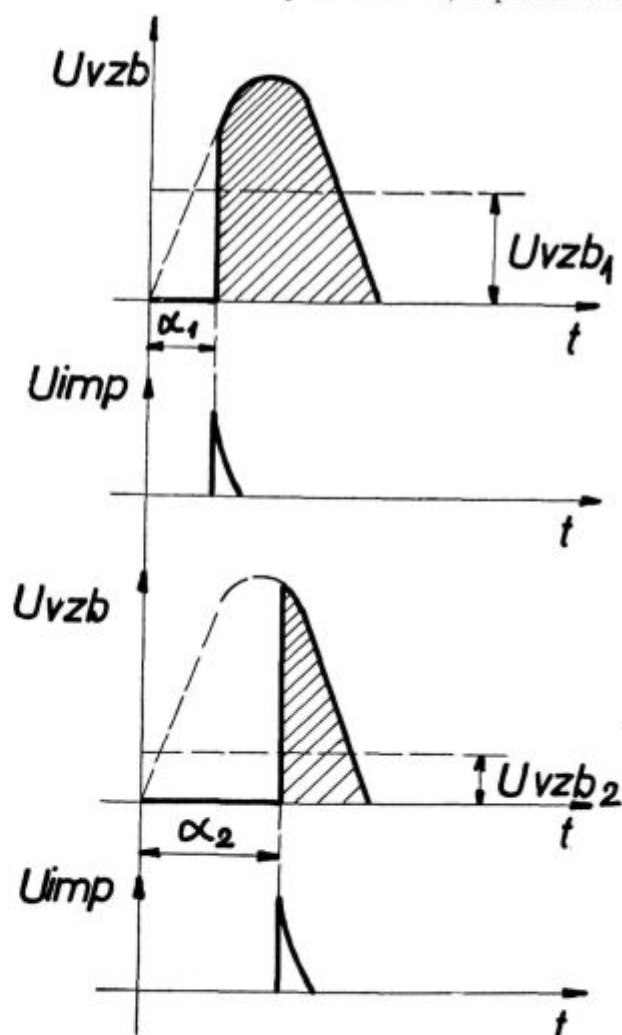
Vidimo, da imamo večjo napetost  $U_d$ , kadar imamo večje vzbujanje MO, torej večjo napetost  $U_{oj}$  ( $I_k$ ). Istočasno s tem pa se seveda spreminja kot zakasnitve vklopa tiristorja  $\alpha$ . (Slika 21.)

Na uporu RB nastane padec napetosti, ki se prenese na primarno stran impulznega transformatorja Tr 2, na izhodu transformatorja pa dobimo v odvisnosti od primarne napetosti sekundarno napetost  $U_{imp}$ . Ta je največja seveda takrat, ko je sprememba primarne napetosti največja, zato v tistem momentu dobimo impulz. Jasno je to razvidno iz slike 22, ki kaže, kakšne impulze dobimo na izhodu impulznega transformatorja.

Ti impulzi so seveda premaknjeni za toliko, kolikor je veliko vzbujanje MO z napetostjo  $U_{oj}$ .

Vidimo, da čim večja je  $U_{oj}$ , tem manj zakasnjene dobimo impulze za vžig tiristorjev, s tem pa seveda večjo izhodno napetost  $U_{vzb}$  (glej sliko 23).

Vidimo, da je MO delno še pri toku  $I_k = 0$  odprt. To pa mi ne želimo, zato na drugo krmiljno navitje vezemo stabilizirano napetost v nasprotni smeri. S tem pomaknemo ordinato iz točke A v točko B. Dobimo željene razmere, s potence-



Slika 23

Spreminjanje vrednosti  $U_{vzb}$  pri različnih kotih vklopa tiristorjev

тром  $P_2$  pa nastavljamo velikost premika ordinate. Na izhodu MO dobimo napetost Ud, katere velikost je odvisna od velikosti napetosti Uoj. Slika v nam to prikazuje.

Na sekundarni strani imamo vezano diodo zaradi tega, da dobimo za vsak tiristor pravi impulz, kajti tiristorja sta vezana z diodama v Grätz spoju, kondenzator  $C_2$  je vezan zato, da loči krmiljno elektrodo od katode, upora R pa sta vgrajena zaradi pravilne porazdelitve napetosti na tiristorje.

Zaščita tiristorjev je izvedena z RC elementi (prenapetostna) ter talilno varovalko V (pretokovna). Kondenzator  $C_3$  je namenjen za glajenje napetosti.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Artikel versuchte ich das physikalische Bild der vierschichtigen Halbleiterelemente zu geben. Ein besonderer Nachdruck ist auf der Beschreibung der VA-Karakteristiken dieser Elemente, weil eben diese sehr gut die Einwirkung der Elemente darstellen. Es sind die Arten des Ein- und Ausschaltens dargestellt sowie die Faktoren, die auf diese einwirken. Gegeben sind die Grundschaltungen des Dinistor-Tiristor. Am Schluss ist das Schema der Steuerung der VAUGHN-Drahtziehmaschinen mittels der Tiristoren dargestellt.

## SUMMARY

In the paper the physical picture of four-layer semiconductor is given.

These are dinistor and tiristor. Especially emphasized is description of VA properties of these elements.

The ways of switching in and switching out are shown and factors influencing it.

The basic circuitry for dinistor-tiristor are shown. At the end regulating scheme of cold drawing wire machine VAUGHN is shown attained by tiristors.

## Literatura

1. Rafael Cajhen, Krmiljena silicijeva dioda — tiristor, Elektrotehniški vestnik, Ljubljana, 1964/9-10 — str. 203 do 205
2. Marijan Lorkovič, Tiristori kao sklopni elementi, Elektrotehničar, Zagreb, 1963/3 — 4 — str. 33—36
3. SA. S. Kublanovskij, Shemi na četirehslajnih poluprovodnikovih priborah, Energija, Moskva, 1967, str. 1—10
4. Tugomir Šurina, Tranzistorska tehnika, str. 382—393, Tehnička knjiga, Zagreb
5. Dokumentacija firme Westinghouse USA, za žičarske stroje VAUGHN

Die Drahtziehmaschinen erfordern eine sehr genaue Regulierung der Umdrehungen des Motors, deswegen ist die Regulierung der Drehzahl so ausgeführt, dass wir kontinuierlich die Spannung der Gleichstrommotoren ändern. Den verschiedenen Spannungswert erreichen wir aber mit der verschiedenen Erregung des Generators, der die Gleichstrommotoren speist. Die kontinuierliche Aenderung der Generatorerregung erreichen wir aber mit der verschiedenen Zeit der Tiristoreinschaltung. Es ist auch die Impulseinrichtung dargestellt, die die Ausschaltung des Tiristors im bestimmten Punkt besorgt mit Rücksicht darauf, welche Umdrehungen wir erreichen wollen.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Афтор излагает физическая данные четырёх-слойных полупроводниковых элементов; это динистор и тиристор. Особенно обширно описаны вольт-ампер характеристики этих элементов потому что именно эти характеристики показывают действие элементов. Показаны способы включения и выключения а также и коэффициенты влияния на эти действия. Приведены основные сочленения динистор-тиристор. В конце статьи рассмотрена схема управления машин для производства проволоки система VAUGHN с тиристором.

Машины для выделки проволоки требуют точную регулировку вращений мотора, поэтому регулировка числа вращений выполнена так что разрешает непрерывно изменять напряжённость питания однонаправленных двигателей. Изменение напряжения достигается разлчным возбуждением генератора который питает двигатели. Непрерывное изменение возбуждения генератора получаем изменением времени включения тиристора.

Описана импульсное приспособление которое позволяет выключение тиристора в определенное время в зависимости от того какое вращение желаем получить.